

Escuela Politécnica Superior

19
20

Trabajo fin de grado

Diseño de un nodo de red inalámbrica para la monitorización de dióxido de carbono



Álvaro Caseiro Moreno

Escuela Politécnica Superior
Universidad Autónoma de Madrid
C/ Francisco Tomás y Valiente nº 11

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**



Grado en Ingeniería Informática

TRABAJO FIN DE GRADO

**Diseño de un nodo de red inalámbrica para la
monitorización de dióxido de carbono**

Autor: Álvaro Caseiro Moreno

Tutor: Stefan Palzer

junio 2020

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución comunicación pública y transformación de esta obra sin contar con la autorización de los titulares de la propiedad intelectual.

La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (*arts. 270 y sgts. del Código Penal*).

DERECHOS RESERVADOS

© 3 de Noviembre de 2017 por UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

Francisco Tomás y Valiente, nº 1

Madrid, 28049

Spain

Álvaro Caseiro Moreno

Diseño de un nodo de red inalámbrica para la monitorización de dióxido de carbono

Álvaro Caseiro Moreno

C\ Francisco Tomás y Valiente Nº 11

IMPRESO EN ESPAÑA – PRINTED IN SPAIN

A mis seres queridos

Las preguntas que no podemos contestar son las que más nos enseñan.

Patrick Rothfuss

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer la paciencia y confianza que han tenido las personas de mi alrededor durante la realización del proyecto: a Stefan Palzer, mi tutor, quien me ha sabido guiar y supervisar; a Álvaro Ortiz, cuyos conocimientos y experiencias me han agilizado el trabajo sacándome de algún que otro apuro; a Gabriel Rodríguez, quien siempre me ofreció ayuda cuando lo necesité y, en especial, a Álvaro Sosa, por ser mi compañero de fatigas y sufrir y disfrutar conmigo de todo el proceso.

Por otra parte, resaltar el apoyo y la comprensión que han mostrado mis amigos y compañeros de la carrera, quienes han conseguido que las partes más duras lo fueran un poco menos, y que las buenas hayan sido mejores.

Y finalmente a mi familia por creer siempre en mí.

RESUMEN

En la actualidad el ser humano se enfrenta a una crisis climática producida por el fenómeno denominado efecto invernadero. Este fenómeno dictamina que parte de la radiación solar que llega a la superficie y debería verse rebotada hacia el espacio se queda retenida debido al efecto de algunos gases de la atmósfera. A dichos gases se les denomina **gases de efecto invernadero (GEI)** y el más frecuente es el **dióxido de Carbono (CO₂)**. El aumento de este gas supone un riesgo para la vida tal y cómo la conocemos y crea la necesidad de un sistema capaz de interpretar y analizar su concentración en cualquier parte del mundo.

El objetivo de este proyecto es el diseño de un nodo para una red inalámbrica capaz de monitorizar el nivel de concentración de CO₂ en el aire. Para ello se ha producido un sensor fundamentado en la detección fotoacústica. Asimismo, un sensor comercial proporciona mediciones de temperatura, humedad y presión. El sistema envía los datos a un server donde son almacenados para su posterior interpretación.

PALABRAS CLAVE

Sensor de CO₂, fotoacústica, LoRa, NDIR, humedad, temperatura, presión

ABSTRACT

Currently, human beings face a climate crisis caused by a phenomenon called the greenhouse effect. This phenomenon dictates that part of the solar radiation that reaches the surface of the planet and should bounce off into space is retained due to the effect of some gases in the atmosphere. These gases are called **greenhouse gases (GHG)**, where the most frequent is carbon dioxide. The increase of this gas poses a risk to life as we know it and creates the need for a system capable of interpreting and analyzing its concentration anywhere around the world.

The purpose of this project is to design a node for a wireless network capable of monitoring the concentration level of carbon dioxide in the air. For this reason, a sensor based on photoacoustic detection has been produced. Furthermore, a commercial sensor provides temperature, humidity and pressure measurements. The system sends all the collected information to a server where it is stored for later interpretation.

KEYWORDS

CO₂ sensor, photoacoustic, LoRa, NDIR, humidity, temperature, pressure

ÍNDICE

1	Introducción	1
2	Estado del arte	3
2.1	Sensor de temperatura	3
2.2	Sensor de humedad	4
2.3	Sensor de presión	5
2.4	Sensor de dióxido de carbono	6
2.5	Protocolo de comunicaciones	8
3	Sistema	11
3.1	Sensor de dióxido de carbono	12
3.1.1	Amplificación	14
3.1.2	Algoritmo Lock In	16
3.2	Sensor de humedad, temperatura y presión	17
3.3	Módulo de comunicación	18
3.4	PCB	19
3.5	Producción de detectores fotoacústicos	20
4	Pruebas y resultados	23
4.1	Toma de medidas y pruebas	23
4.2	Resultados	24
5	Conclusión	29
	Bibliografía	32
	Definiciones	33
	Acrónimos	35
	Apéndices	37
A	Estructura del programa	39
B	Construcción de un paquete para su transmisión	41

LISTAS

Lista de códigos

B.1	Función de construcción de un paquete LoRa	41
-----	--	----

Lista de ecuaciones

2.1	Capacidad de un condensador	5
2.2	Ley de Beer-Lambert	8
3.1	Divisor de tensión	15
3.2	Producto de cosenos de frecuencias distintas	16
3.3	Producto de cosenos de frecuencias iguales	16

Lista de figuras

1.1	Funcionamiento del Sistema	2
2.1	Polímero resistivo de un sensor de humedad	5
2.2	Funcionamiento de un sensor capacitivo de presión	6
2.3	Espectro de luz y absorción de ondas	7
2.4	Funcionamiento de un sensor NDIR	8
2.5	Señal Chirp	9
3.1	Esquema del sistema	11
3.2	Comportamientos de las diferentes ondas de modulación de un led	12
3.3	Fotoacústica	13
3.4	Soporte led	14
3.5	Señal original, señal amplificada y transformada de Fourier	15
3.6	Producto de dos senos	16
3.7	BME280	18
3.8	Jerarquía de una red que utiliza LoRa	19
3.9	Placa base del sistema y sus componentes	20
3.10	Cámara de gas	21

4.1	Relación entre señal obtenida y concentración suministrada.	24
4.2	Formalización de una línea base en la relación señal-concentración	25
4.3	Pruebas de funcionamiento del BME280	25
4.4	Relación entre la temperatura y la señal producida en ausencia de CO ₂	26
4.5	Relación entre la humedad y la señal medida.	26
4.6	Paquetes recibidos en el server mediante LoRa	27
A.1	Estructura del proyecto	39

INTRODUCCIÓN

Las reacciones termonucleares que tienen lugar en el sol producen una gran cantidad de radiación que viaja por el espacio hasta la atmósfera de la Tierra, donde se refleja parte de esa energía de nuevo al espacio [1]. La restante es absorbida por la troposfera, donde se encuentra la mayor parte de masa atmosférica compuesta por gases y partículas, y la superficie terrestre, que actúan como un almacén guardando dicha energía. Gracias a este almacenamiento de energía la temperatura global se mantiene en un rango que hace posible la existencia de vida en la tierra. Por la similitud entre la forma en la cual el planeta mantiene el calor y un invernadero, a aquellos gases que se encargan de absorber la radiación se les denomina gases de efecto invernadero [2]. El problema surge cuando el balance entre radiación solar y GEI se ve alterado, con la consecuencia de un cambio de la temperatura a nivel global y el peligro que ello conlleva. Los GEI son: vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), clorofluorcarbonos (CFC), ozono (O_3) y hexafluoruro de azufre (SF_6).

Por lo tanto, un aumento de CO_2 supone también un aumento de las temperaturas. Este aumento acarrea peligrosas consecuencias para la vida en la Tierra. Entre estas consecuencias se encuentran los riesgos para sistemas únicos y amenazados, como sería el deshielo de los polos, que supondría inundaciones en las zonas costeras alrededor del globo; los riesgos de sucesos meteorológicos extremos, como las sequías o las olas de calor; o el efecto sobre los grupos vulnerables, como la población anciana o las personas en situación de pobreza [3].

La tecnología actual no satisface todos los requerimientos y se acentúa la necesidad de una red de sensores capaz de aportar información relevante acerca de la evolución de los gases. Por esta razón se ha diseñado un proyecto que tiene como objetivo la creación de un nodo para una red inalámbrica capaz de monitorizar el nivel de concentración de CO_2 en el aire, medir la temperatura, presión y humedad y enviar dichos datos de forma periódica y ajustable a un servidor donde se almacenarán.

El sistema se ha construido estudiando la fiabilidad, eficiencia y coste de cada componente, desde los comerciales hasta los aquellos de diseño propio. Todo ello con el objetivo de conseguir un sensor competente y accesible. Entre los componentes se encuentra un sensor comercial de humedad, presión y temperatura, un sensor de diseño propio basado en el principio de la fotoacústica compuesto

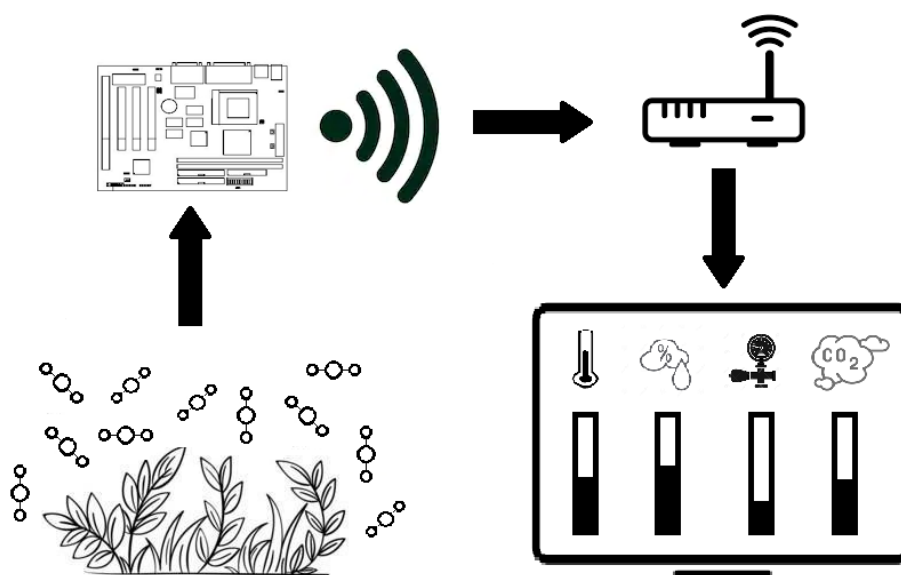


Figura 1.1: Funcionamiento del sensor de CO₂. Representación de un sistema capaz de realizar mediciones de gas y enviar datos acerca de la concentración, la temperatura, la humedad y la presión.

por un led y un micrófono, un conversor de ondas analógicas a digitales, un elemento electrónico de radiofrecuencia para la comunicación con el un servidor de almacenamiento y un microcontrolador que dirige las comunicaciones entre componentes. Todos los elementos están integrados e interconectados mediante una placa base.

Este documento se organiza en 5 capítulos diferentes. En el capítulo 2 se desarrolla y discute el estado del arte de la sensorización medioambiental. En el capítulo 3 se describe el funcionamiento del sistema, explicando la utilización de los componentes y los algoritmos implementados. En el capítulo 4 se muestran los resultados de las pruebas realizadas, así como el significado de dichos resultados. En último lugar, en el capítulo 5 se recoge la conclusión y se incluyen posibles puntos de mejora para futuras versiones.

ESTADO DEL ARTE

El aumento de gases en la atmósfera terrestre que en las últimas décadas se ha producido ha provocado la necesidad de incrementar el desarrollo y la investigación de elementos capaces de medir y estudiar dichos parámetros. Para poder elaborar los mecanismos necesarios hay que entender cómo se comporta un gas y qué factores afectan a ese comportamiento. Entre estos factores se encuentran la presión y la temperatura. La ley de Gay-Lussac estipula que, a volumen y masa constantes, el aumento de temperatura supone una excitación de las moléculas que origina un aumento de la presión [4] [5]. A su vez, otro factor influyente en el comportamiento de algunos gases es la humedad relativa. La humedad relativa es la relación entre la cantidad de vapor de agua contenida en el aire (presión parcial del vapor de agua) y la máxima cantidad que el aire sería capaz de contener a esa temperatura (presión de vapor de equilibrio del agua a una temperatura dada). A presión fija, la variación de humedad relativa es inversamente proporcional a la variación de la temperatura [6].

2.1. Sensor de temperatura

Un sensor de temperatura es un dispositivo que proporciona una medición de temperatura a través de una señal eléctrica. [7]. Dotados de una gran importancia para los estudios referentes a la ingeniería y el medio ambiente, existen, principalmente, 5 tipos: termistores, sensores infrarrojos, **detector de temperatura resistivo (DTR)**, termopares y sensores basados en semiconductores [8]. En este proyecto se ha utilizado un termistor debido a que tiene una velocidad de respuesta alta. Este componente es una resistencia cuya impedancia varía a medida que se producen cambios en la temperatura. Se clasifican en dos tipos diferentes: los **coeficiente positivo de temperatura (CPT)**, que aumentan la resistencia a medida que aumenta la temperatura, y los **coeficiente negativo de temperatura (CNT)** que aumentan la resistencia a medida que disminuye la temperatura [9]. Para su calibración se mide el valor de la resistencia a una temperatura T establecida. Suponen una opción de bajo coste que presenta una relación casi lineal entre la temperatura y la impedancia de la resistencia. Se producen en varios materiales, siendo el platino la opción mas común. Estos elementos ofrecen una alta precisión en las medidas (del orden de las décimas de grado) y un amplio rango de temperaturas (entre -200 y 600°C).

2.2. Sensor de humedad

Un sensor de humedad es un dispositivo capaz de medir la cantidad de vapor de agua en la atmósfera o en un gas. Estos sensores son utilizados en campos como monitorización ambiental, electrónica, agricultura y biomedicina [10]. Se pueden distinguir tres tipos: los ópticos, los acústicos o los electrónicos. Dentro de este tercer grupo se pueden diferenciar en: capacitivos, piezoresistivos, magnetoelásticos y de resonancia de plasmones superficiales. El sensor de humedad que se ha empleado ha sido del tipo capacitivo debido a que éstos ofrecen una representación lineal de la humedad, un rango completo (0 - 100 %) y un coste asequible.

El sensor capacitivo de humedad es un pequeño condensador que consiste en un material dieléctrico higroscópico colocado entre un par de electrodos. La mayoría de los sensores capacitivos usan un plástico o polímero como material dieléctrico, con una constante dieléctrica típica que varía de 2 a 15. Cuando no hay humedad presente en el sensor, tanto esta constante como la geometría del sensor determinan el valor de la capacitancia [11]. Una rejilla de electrodos se recubre de una sustancia sensible a la humedad embebida en el polímero. Esto se reviste con una capa sensible al vapor de agua, que, a medida que es penetrada por la humedad, origina que los electrodos se ionicen. Cuando una corriente excita los electrodos, la impedancia se altera [12]. Observando el valor de la impedancia a una humedad H conocida se puede estimar la relación entre dicha impedancia y la humedad relativa en el ambiente.

Como se puede observar más adelante en la figura 2.3, en el rango de absorción de ondas IR del CO_2 el vapor de agua absorbe una porción casi despreciable, lo que indica que la humedad no es un factor que afecte al funcionamiento del sensor. No obstante, la medición de humedad sigue siendo relevante por su efecto sobre los componentes electrónicos, como pueden ser la corrosión o la reducción de la tensión de bloqueo [13].

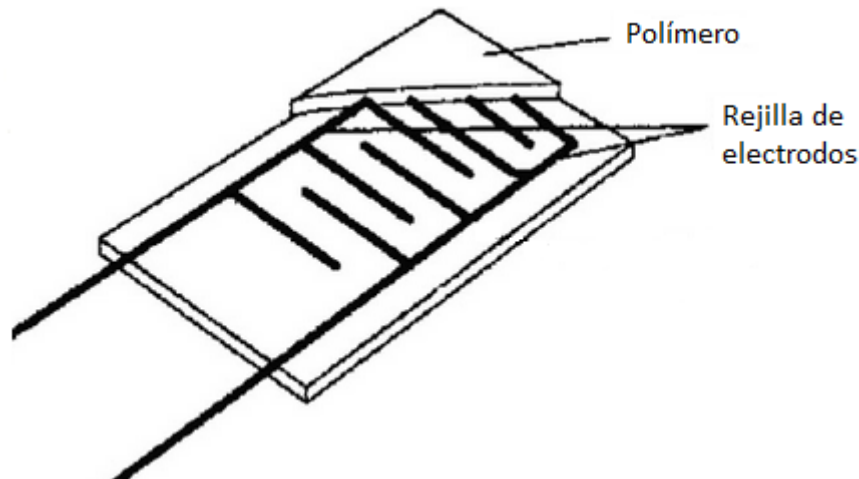


Figura 2.1: Polímero resistivo de un sensor de humedad. Rejilla de electrodos cubierta de un polímero sensible a la humedad.

2.3. Sensor de presión

Un sensor de presión es un dispositivo capaz de medir fuerza física ejercida sobre o contra un objeto. Este tipo de sensores posee un amplio rango de aplicaciones en campos como la medicina (medición de la presión de la sangre), el sector automovilístico (presión de las ruedas o del tanque de gasolina), ingeniería medioambiental (presión atmosférica), etc [14]. Se han estudiado los 5 tipos más representativos: calibradores de tensión, sensores capacitivos, sensores potenciométricos y sensores de resonancia [15]. Se ha utilizado uno de tipo capacitivo, ya que ofrece una gran precisión (0.25 % de error máximo) a un coste económico. Un sensor de presión capacitivo se basa en la deformación de un condensador, que es un elemento formado por una par de superficies conductoras paralelas denominadas placas. La capacidad de un condensador se mide mediante la fórmula

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (2.1)$$

donde C es la capacidad, ϵ es la constante dieléctrica, A es el área efectiva de las placas y d la distancia entre ellas. Por lo tanto, cuando una placa se deforma, inducida por la presión, la distancia se reduce, lo que hace que aumente la capacidad.

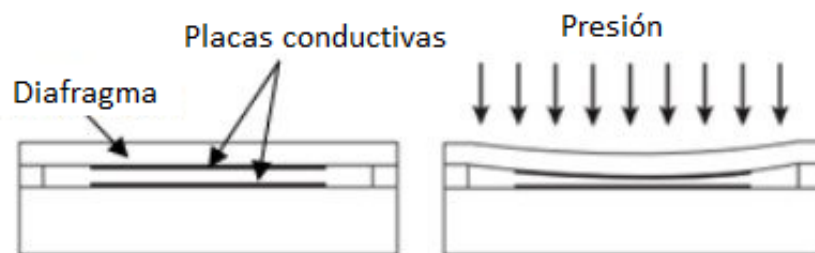


Figura 2.2: Funcionamiento de un sensor de presión. Cuando se deforma una de las placas la distancia entre ellas varía afectando a la capacidad total del condensador.

2.4. Sensor de dióxido de carbono

Comprendidos los mecanismos para medir las magnitudes que afectan a los gases se han estudiado los diferentes tipos de sensores de gas que existen en la actualidad. La idea principal es poder detectar los niveles de concentración de gas en el ambiente y ser capaz de tratar dicha información. Para realizar esta tarea existen fundamentalmente 6 modelos de sensor: basados en la oxidación del metal, ópticos, acústicos, electroquímicos, basados en la capacitancia y calorimétricos [16]. No obstante, la mayoría se encuentran limitados, ya sea por no conseguir ofrecer una precisión suficiente o por una utilización de recursos como son el espacio o el dinero muy alta. Es por esto que se ha elegido utilizar un sensor óptico. Estos sensores se basan en la absorción de energía proveniente de la luz por parte de las moléculas de gas.

No obstante, no todas las moléculas reaccionan de la misma manera o, en su defecto, reaccionan a cualquier emisor de luz o radiación. Estos emisores se diferencian dentro del espectro electromagnético en regiones adyacentes sin frontera definida, divididos en base a su frecuencia o su longitud de onda [18]. En el caso del ser humano existe una región denominada espectro visible que contiene aquellas longitudes de onda que el ojo es capaz de percibir. Esta región se encuentra en una longitud de onda de entre 400nm y 750nm aproximadamente, mientras que la absorción del CO_2 se divide, como se puede observar en el gráfico de absorción de luz en la figura 2.3, en tres secciones diferenciadas: la primera en el rango cercano a los infrarrojos, aproximadamente $2.7\mu\text{m}$; la segunda en el rango de los infrarrojos, aproximadamente $4.5\mu\text{m}$ y la última en el rango de las microondas, aproximadamente $15\mu\text{m}$.

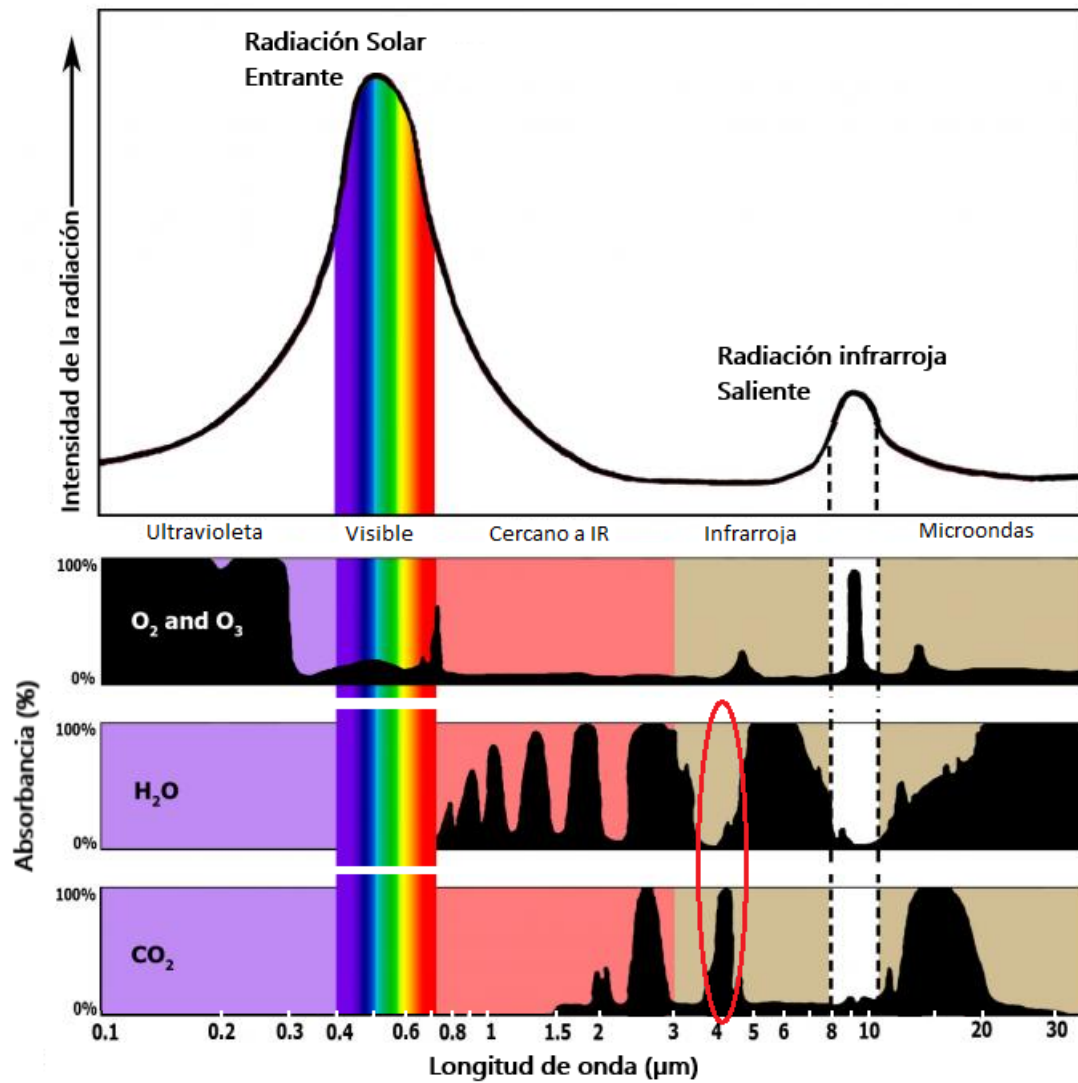


Figura 2.3: Espectro de luz y absorción de ondas. Absorción de luz y rango de absorción por parte del agua y el CO₂ [17]

Los sensores **espectroscopia de infrarrojos no dispersiva (EIND)**, o del inglés NDIR, están basados en la absorción de las ondas **infrarrojas (IR)** [19] por parte del CO_2 . En la figura 2.3 se puede observar que el rango en el cual el CO_2 absorbe energía coincide con el rango de las ondas IR.

Estos sensores se componen de una fuente de luz IR y un detector enfrentados con el objetivo de enfocar la mayor parte de las ondas en dirección directa al detector. Parte de la energía IR se ve absorbida por las moléculas de gas que se encuentran a lo largo del recorrido.

En función de la cantidad de luz que llega al detector se puede calcular cuánta se ha absorbido y, por ende, la concentración de gas. Este cálculo se realiza a través de la ley de Beer-Lambert [20], que establece la relación de la intensidad de luz entrante en un medio con la intensidad saliente después de que en dicho medio se produzca absorción

$$I_1 = I_0 e^{-\sigma l N} \quad (2.2)$$

donde I_1 es la intensidad saliente, I_0 la intensidad entrante, l es el camino óptico, σ es el área de absorción de una molécula de gas y N es la concentración del gas en el ambiente. Un ejemplo del funcionamiento de estos sensores puede verse en la figura 2.4.

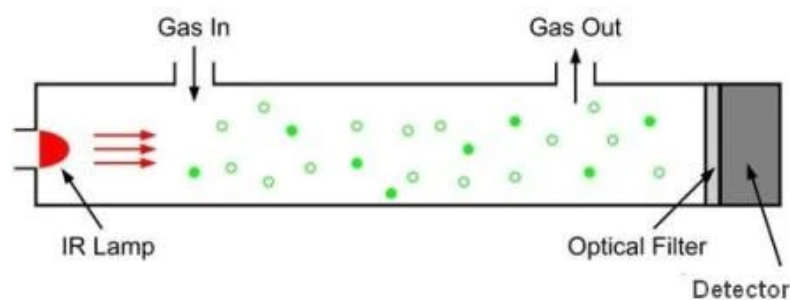


Figura 2.4: Funcionamiento de un sensor NDIR. Luz IR es emitida a través de moléculas de gas que absorben parte de dicha luz hacia un detector [21].

2.5. Protocolo de comunicaciones

La transmisión de datos es una parte esencial del proyecto. Debido a que uno de los objetivos del diseño es dotar al sistema de versatilidad en cuanto a su localización, se decidió que el envío de datos debía ser mediante un protocolo inalámbrico. Entre los más utilizados en el mercado actualmente se encuentran: WiFi, Bluetooth Low Energy, ZigBee, WirelessHART y LoRa [22].

En este proyecto se ha decidido utilizar **Long Range (LoRa)**. Éste es un protocolo de área amplia y

baja frecuencia basado en técnicas de modulación de espectro extendido (técnica de modulación para la transmisión de datos digitales por radiofrecuencia [23]) que derivan de las técnicas **Chirp Spread Spectrum (CSS)**. Estas técnicas utilizan pulsos Chirp (señales sinusoidales cuya frecuencia aumenta o disminuye en el tiempo) modulados de frecuencia lineal de banda ancha para codificar la información [24]. Un ejemplo de una señal Chirp se puede observar en la figura 2.5.

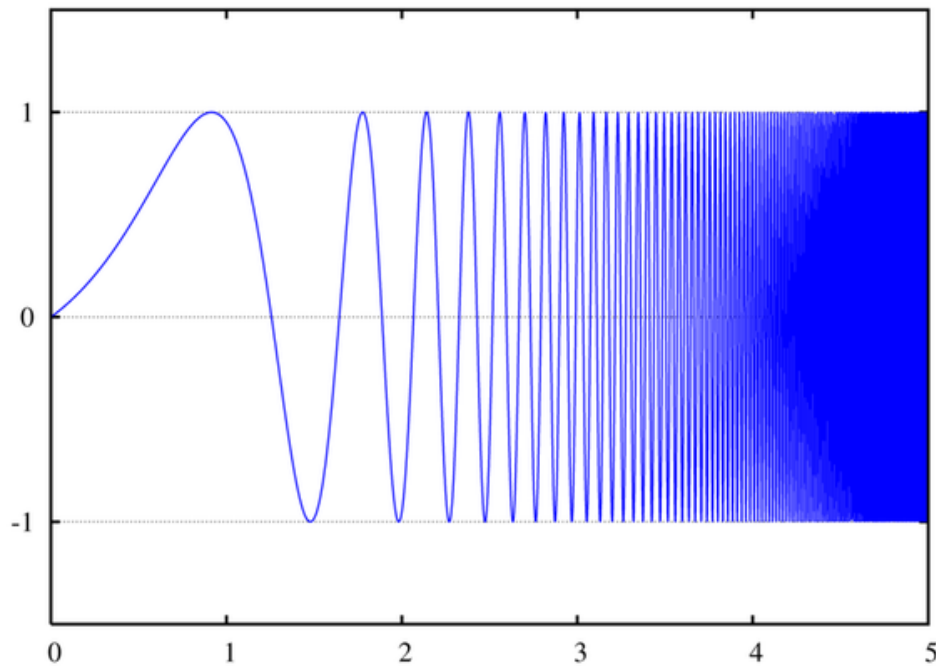


Figura 2.5: Señal Chirp. Señal sinusoidal cuya frecuencia aumenta a lo largo del tiempo [25]

LoRa es un protocolo de comunicación diseñado para la transmisión de datos en largas distancias (orden de los km) [26]. Gracias al tipo de sistema de envío de información dispone de una alta tolerancia a las interferencias y un consumo bajo de energía. En Europa trabaja a una frecuencia de 868 Mhz, siendo 915 MHz en America y 433 MHz en Asia.

La conexión de un dispositivo individual que utiliza la tecnología LoRa se hace punto a punto con un servidor. The Things Network es una infraestructura de código abierto que ofrece un sistema de administración de dichos dispositivos y representación, clasificación y almacenamiento de la información.

SISTEMA

En este TFG se ha diseñado un sistema de lecturas y mediciones de CO₂ en el ambiente sobre una placa base que cuenta con un sensor comercial de temperatura, presión y humedad (BME280 ¹), un módulo de comunicaciones comercial (RFM95 ²) y un sensor del gas a estudiar de diseño propio. Todo esto se dirige a través de un microcontrolador (PSoC CY8C5488AXI-LP120 ³) y el protocolo de comunicación **interfaz periférica serial (IPS)** o, por sus siglas en inglés, SPI. El sistema toma medidas de forma periódica que se envían a un servidor accesible a través de infraestructura de código abierto llamada "The Things Network" donde se recogen y representan los datos. En la figura 3.1 se puede ver un esquema del funcionamiento del sistema.

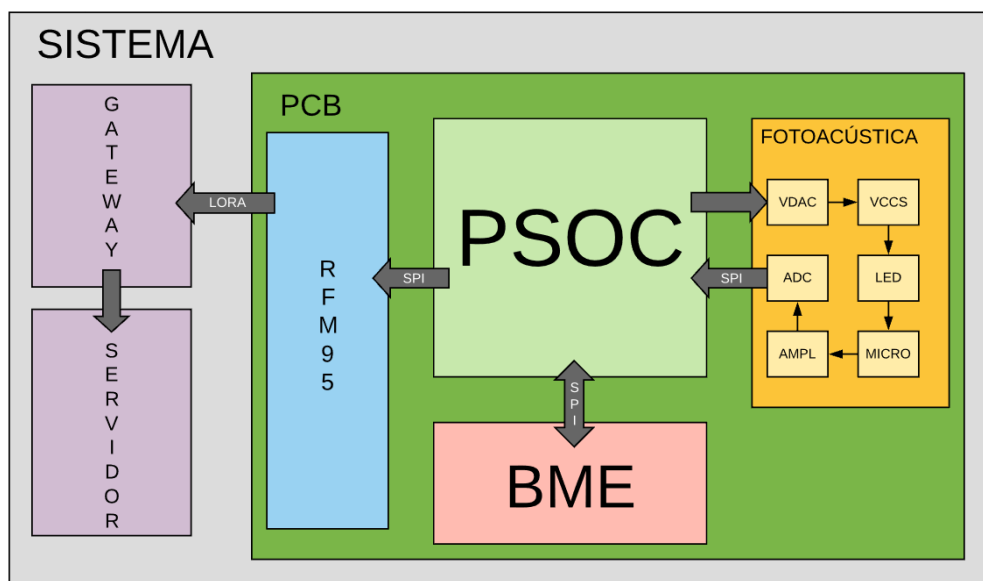


Figura 3.1: Funcionamiento del sistema. Esquema representativo del funcionamiento del sistema y sus componentes.

¹ Bosch Sensortec, Kusterdingen, Alemania, BME280 datasheet https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/datasheets/BST-BME280-DS002.pdf Fecha de acceso: 06/05/2020

² HOPERF, Shenzhen, China, Rfm95 datasheet https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/8/0/4/RFM95_96_97_98W.pdf Fecha de acceso: 06/05/2020

³ Cypress Semiconductor, California, Estados Unidos, CY8C5488AXI-LP120 datasheet https://www.mouser.es/datasheet/2/100/Cypress_CY8C54LP_001-84934_0E-1161174.pdf Fecha de acceso: 06/05/2020

3.1. Sensor de dióxido de carbono

El sensor diseñado se basa en un principio fotoacústico. La fotoacústica, o también conocida como optoacústica fue presentada por Alexander Graham Bell en 1880. Descubrió que la absorción de ondas electromagnéticas a través de un medio (p.e. agua o aire) generaba cambios de presión que se pueden percibir en forma de sonido. La idea detrás de la fotoacústica se basa en un principio fototermal: la luz emite energía que es absorbida y convertida en calor, el calor expande las partículas y esto genera un cambio de presión, lo que produce una onda sonora [27].

Las moléculas de CO_2 repartidas en el aire entran en estado de excitación al ser calentadas y liberan dicha energía al enfriarse. De esta manera, dependiendo de la concentración de gas que haya entre nuestra fuente lumínica y el micrófono, variará la cantidad de energía que llega a la cápsula, lo cual determinará la cantidad de vibración y, por ende, el volumen de la onda sonora.

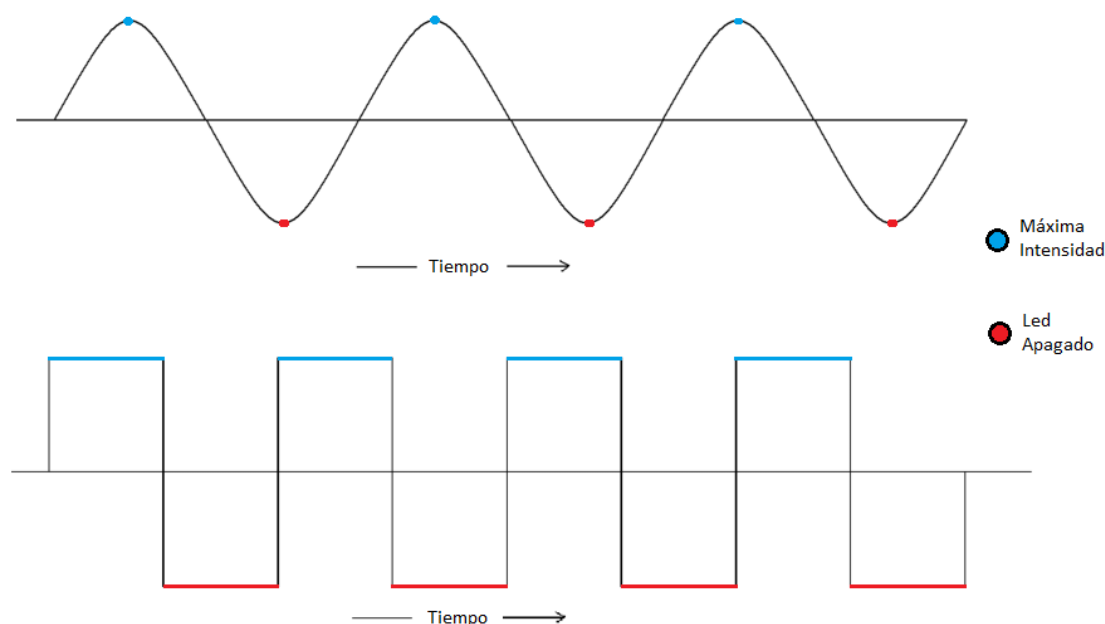


Figura 3.2: Comportamiento de una onda sinusoidal y de una onda cuadrada. Periodos de máxima y mínima intensidad en dos diferentes ondas para la modulación de un led.

El funcionamiento del sensor se basa en el principio fotoacústico explicado. El led comercial L13201-4030C⁴ es un componente que trabaja a $4.3\mu\text{m}$, cercano al pico de absorción del CO_2 . Este led se modula a través del microcontrolador mediante una onda generada por un módulo **pulsación por ancho de pulsos (PAP)** o PWM por sus siglas en inglés. Un PWM es una señal de forma cuadrada que optimiza la eficacia frente a otros tipos de ondas en las cuales existe un crecimiento continuo (figura 3.2). Al fluctuar entre apagado y completamente encendido de una forma tan brusca el periodo en el

⁴Hamamatsu, Shizuoka, Japón, L13201-4030C datasheet https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/l13201_series_kled1069e.pdf Fecha de acceso: 06/05/2020

cual la onda no se encuentra en alguno de sus puntos más extremos se reduce, provocando que se encuentre en el máximo y el mínimo de intensidad el mayor tiempo posible.

Las ondas producidas viajan a través del medio hasta un micrófono ICS-40619⁵ soldado a una cápsula llena de CO₂, donde las moléculas se calientan y enfrían rápidamente generando una onda que captura el micrófono. El objetivo del sellado es evitar que el gas se libere y realizar un filtro sobre otras posibles partículas que absorban luz IR. Con un entorno con la mayor proporción de CO₂ se asegura que la onda captada por el micrófono venga de la interacción entre la luz y el gas estudiado. Además, se optimiza de esta manera el número de partículas excitadas y, por lo tanto, se captura una onda mayor. Asimismo, la cápsula sirve como método de protección para el micrófono contra el medio exterior.

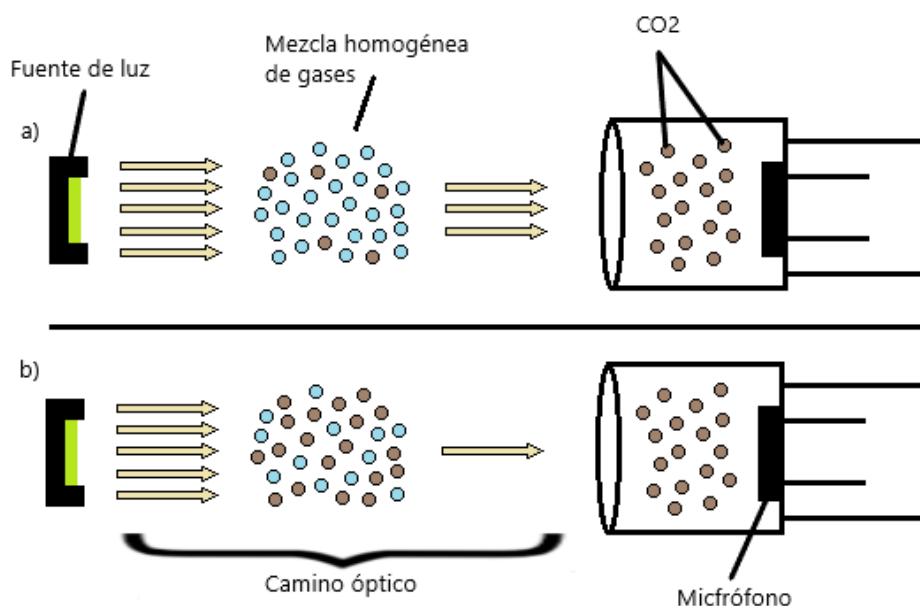


Figura 3.3: Representación de la absorción de energía por los gases del aire. En la parte superior (a) la energía es absorbida en menor cantidad al haber una concentración mas baja de CO₂. En la parte inferior la concentración es mayor dejando pasar una parte más reducida de la energía.

Con el objetivo de optimizar el **camino óptico** se ha diseñado una pieza que funciona como soporte para el led, enfrentándolo directamente al micrófono. De esta manera se fija una distancia de 4mm que garantiza la recepción de señal.

⁵InvenSense, California, Estados Unidos, ICS-40619 datasheet <http://www.farnell.com/datasheets/2632677.pdf> Fecha de acceso: 06/05/2020

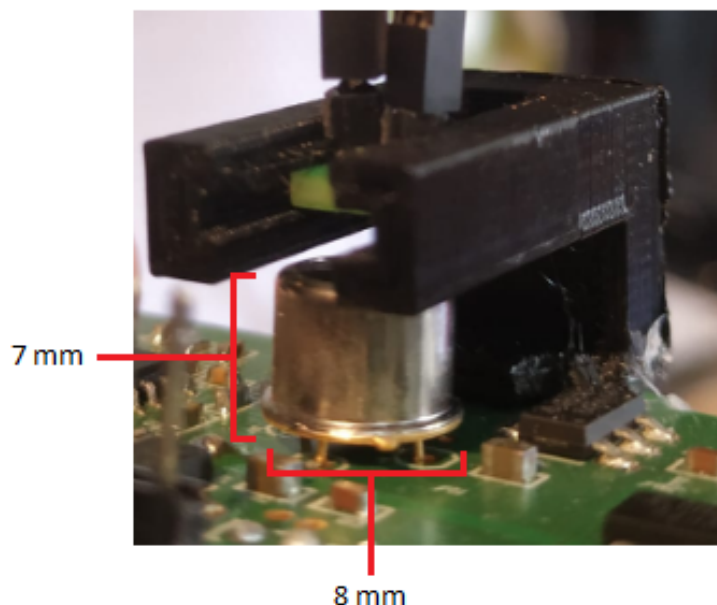


Figura 3.4: Soporte del led. Pieza diseñada para sostener el led enfrentándolo al micrófono.

3.1.1. Amplificación

La señal que se capta en el micrófono precisa de una transformación a un lenguaje que el sistema sea capaz de interpretar. Para realizar esta operación se utiliza el **convertor analógico digital (ADC)** LTC232114 ⁶. Este componente transforma señales analógicas, ya sean de tensión o corriente, en señales digitales.

No obstante, la señal que produce el micrófono carece de la intensidad suficiente para que el ADC pueda tratarla. Además, el ADC trabaja con ondas que fluctúan entre 0V y 2.5V, lo que hace necesario adaptar la señal a este rango. Por lo tanto, y con el objetivo de aumentar y ajustar la onda, se ha requerido el uso de 4 amplificadores operacionales comerciales.

El primero de ellos es el THAT 1510 ⁷, especialmente seleccionado por su alto rendimiento en sistemas de audio (ofreciendo una ganancia de hasta 60dB/1V). Además, este componente unifica la salida positiva y negativa del micrófono en una sola señal manejable para el resto del sistema.

Los siguientes amplificadores pertenecen a la familia de amplificadores TS46 ⁸. Estos amplifi-

⁶Analog Devices, Massachusetts, Estados Unidos, LTC232114 datasheet <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/232114fc.pdf> Fecha de acceso: 06/05/2020

⁷THAT Corporation, Massachusetts, Estados Unidos, THAT1510 datasheet <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/93263/ETC/THAT1510.html> Fecha de acceso: 06/05/2020

⁸STMICROELECTRONICS, Ginebra, Suiza, Ts46X datasheet <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/546706/STMICROELECTRONICS/TS462.html> Fecha de acceso: 06/05/2020

cadorez destacan por su baja distorsión (del 0.003 %), no añadir ruido (4 nV/Hz) y por su versatilidad gracias a su rango de trabajo (entre 2.7 y 10V). Los dos primeros cuentan con un filtrado paso bajo y un filtro paso alto, que eliminan las frecuencias extremas reduciendo el ruido. El último se encarga de elevar la señal por encima de los 0V gracias a un divisor de voltaje

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} \quad (3.1)$$

donde V_{out} es la tensión objetivo, R_1 y R_2 son las resistencias entre las que se divide la tensión y V_{in} es la tensión a dividir.

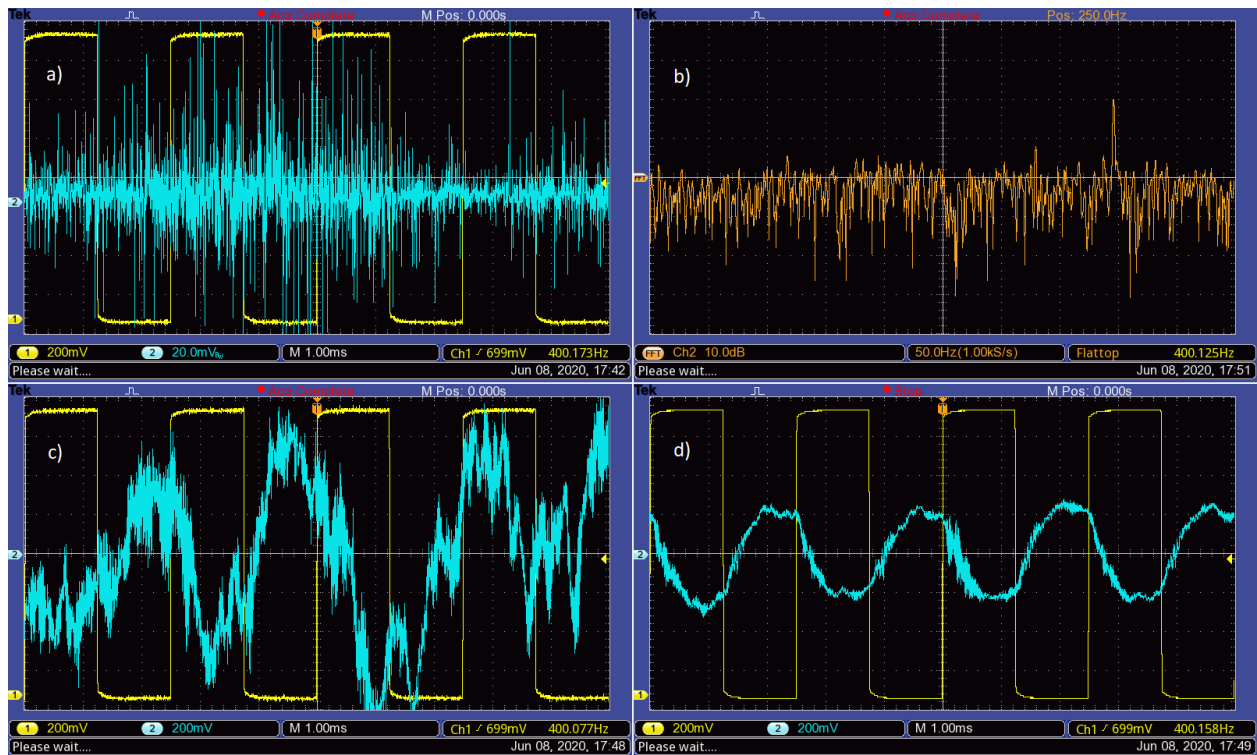


Figura 3.5: Amplificación del sistema. (a) Señal originada por el micrófono, (b) Transformada de Fourier de la señal amplificada, (c) señal amplificada y (d) media de 64 muestras de la señal amplificada

En la figura 3.5 se puede observar el resultado del proceso de filtración y ajuste de la señal. En primera instancia se ha realizado una medición de la onda producida por el micrófono (apartado a)), que es mayoritariamente ruido y carece de intensidad. No obstante, una segunda medición tras el periodo de amplificación (apartado c)) demuestra que la onda ha sido aumentada y ajustada además de la eliminación de gran parte del ruido. Para observar una señal limpia se ha realizado una media de 64 medidas tras la amplificación (apartado d)). Todas las medidas están superpuestas al pulso de modulación del LED, donde se observa un desfase entre las ondas. Este desfase es debido al principio fotoacústico en el que se basa el sistema. Cuando el LED tiene menos intensidad, las moléculas se enfrían liberando la energía absorbida lo que produce vibración y un nivel de señal más alto. Además,

se encuentra representada la transformada rápida de Fourier (apartado b)), donde se percibe un pico en los 400Hz a causa de que esa es la frecuencia de modulación del LED.

Una vez se ha transformado y ajustado la onda y con el objetivo de extraer la información requerida, se le aplica el algoritmo Lock In.

3.1.2. Algoritmo Lock In

Para poder explicar cómo funciona el algoritmo de Lock In [28] es necesario comprender la base matemática que hay detrás. Toda onda a lo largo del tiempo se puede representar como un seno o un coseno. La fórmula que describe el producto de dos cosenos es la siguiente:

$$V_{\alpha}(t)V_{\beta}(t) = \frac{A}{2}[\cos((\omega - \Omega)t + \phi) - \cos((\omega + \Omega)t + \phi)] \quad (3.2)$$

Ahora bien, si la frecuencia del primer coseno, ω , es igual a la frecuencia del segundo coseno, Ω , la fórmula se simplifica a:

$$V_{\alpha}(t)V_{\beta}(t) = \frac{A}{2}[\cos(\phi) - \cos((2\omega)t + \phi)] \quad (3.3)$$

Estas dos fórmulas se pueden ver representadas gráficamente en la figura 3.6.

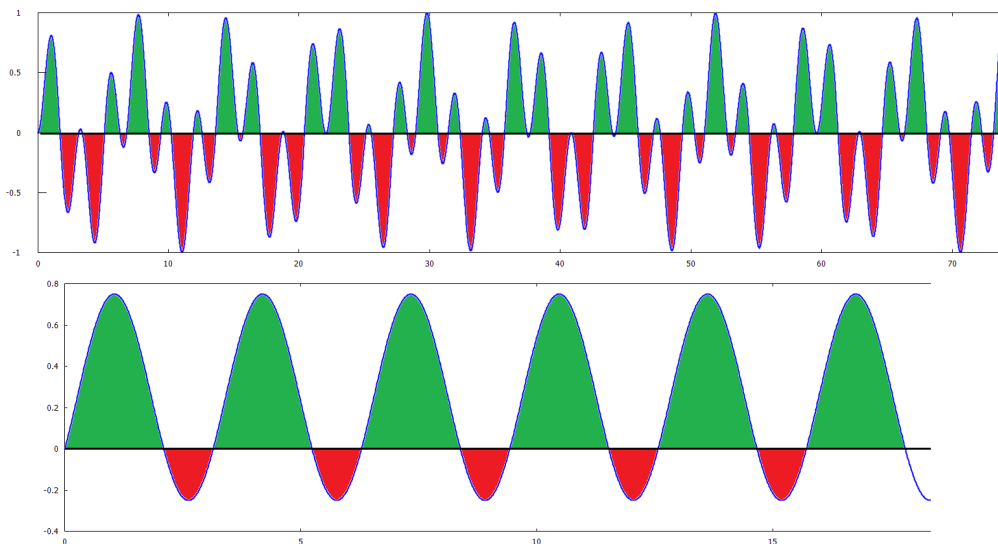


Figura 3.6: Representación gráfica del producto de dos cosenos. La gráfica de la parte superior corresponde al producto de cosenos con diferente frecuencia, en la parte inferior los cosenos tienen frecuencias iguales [28].

La integral de coseno es $\cos(x)dx = A\sin(x) + C$, donde C es la fase y A la amplitud de la

onda. Esto implica que dicha integral está acotada en función de la amplitud, el máximo valor será A y el mínimo valor será $-A$. Por lo tanto, si se integrase el producto de dos cosenos con diferente frecuencia obtendríamos la suma de dos senos que, al ser valores acotados, nos dan un valor acotado en función del tiempo que tiende a 0 en el infinito. Sin embargo, si se tratara de dos cosenos de misma frecuencia el resultado sería un seno más una función lineal en el tiempo que tiende a infinito en el infinito, es decir, no está acotada y crece de forma continua.

El teorema de Fourier afirma que cualquier señal dada se puede descomponer en senos y cosenos. Si aplicamos el teorema a la señal dada por el micrófono y se conoce la frecuencia de modulación del LED, se puede extraer la onda que representa la medida de CO_2 y diferenciarla del posible ruido existente.

Por lo tanto, para aplicar el algoritmo Lock In, se toma una señal de referencia que tenga la misma frecuencia que la modulación del LED y la señal del micrófono. Dichas señales se multiplican e integran a tiempos largos y, debido a que todas las componentes de la señal del micrófono menos la que se atribuye a la de modulación del LED son acotadas, se produce un filtro pasa-banda que elimina el ruido.

Para su implementación se han extraído 100 valores equidistantes en el tiempo de un periodo de una onda que comparte frecuencia con la modulación del led, 400Hz. Estos valores se utilizarán como referencia para los cálculos posteriores. A continuación se ha tomado una medida del ADC en esos mismos intervalos asegurando de esta manera que la onda de referencia y la onda sobre la que se mide están en la misma fase. El valor final resulta de realizar el sumatorio del producto de los valores de nuestra medida y los simulados previamente.

3.2. Sensor de humedad, temperatura y presión

Para la medición de humedad, presión y temperatura se ha utilizado el sensor comercial BME280. Ofrece una gran estabilidad a lo largo del tiempo y destaca su **compatibilidad electromagnética**. Proporciona una respuesta rápida y precisa en las mediciones, además de generar poco ruido. Es flexible a la hora de elegir un protocolo de comunicación, ofreciendo la posibilidad de utilizar tanto I^2C como SPI en el envío de datos. Este pequeño componente (2.5mm de alto x 2.5mm de ancho x 0.93mm de alto) mide temperaturas entre -40°C y 85°C , porcentajes de humedad de hasta el 100 % con un error del 3 % y presiones entre 300hPa y 1100hPa con un error del 3 %. Tiene un consumo de corriente máximo muy bajo, 3.6 A a una frecuencia de 1Hz de toma de datos.

Para su configuración se ha utilizado el protocolo de comunicación SPI. El funcionamiento se basa en la lectura de unos parámetros asignados de fábrica y almacenados en los registros internos. Estos parámetros se utilizan para calibrar las tres magnitudes a medir, aplicándolos en las funciones de compensación para calcular el valor de la temperatura, la presión y la humedad.

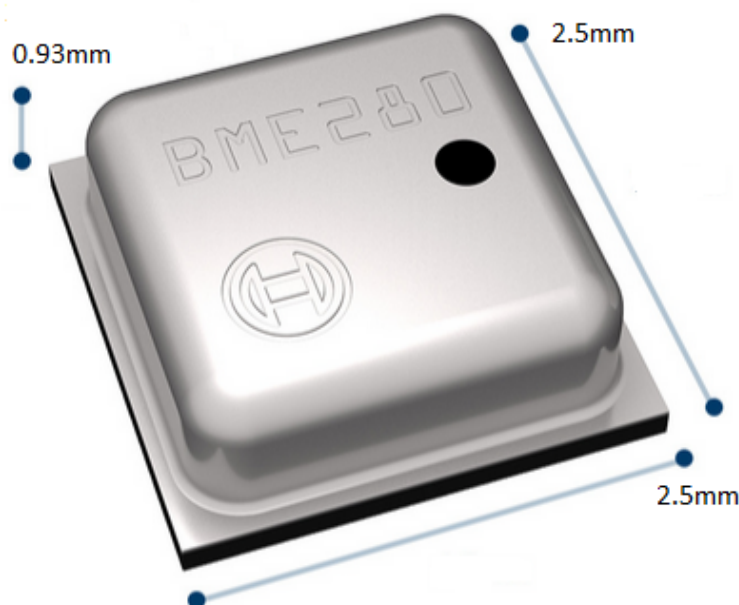


Figura 3.7: BME280. Sensor de humedad, presión y temperatura, con unas dimensiones de 2.5mm de ancho por 2.5mm de largo por 0.93mm de alto.

3.3. Módulo de comunicación

Con el objetivo de evitar limitar la localización del sistema en lo máximo posible se ha decidido incorporar un protocolo de transmisión de datos con un rango de envío alto. Para ello se ha decidido utilizar el protocolo LoRa (el cual alcanza distancias del rango de los km). El RMF95 es un componente electrónico de radiofrecuencia diseñado para ejecutar dicho protocolo. Proporciona comunicación de espectro ensanchado de largo rango e inmunidad de alta interferencia mientras minimiza el consumo de corriente (consumo de corriente medio de 1.6mA). Cuenta con un rango de trabajo medio de entre 1.3V y 3.6V. Es un componente considerablemente pequeño, con unas dimensiones de 16mm de ancho y 16mm de largo.

Se ha implementado para que transmita una medida de manera periódica al servidor. Esta medida es enviada en forma de paquetes de 12 bytes. Los 2 primeros corresponden a la medición de la temperatura, los bytes 4 y 5 a la de humedad, del 7 al 9 a la de presión y los últimos dos son la concentración de CO₂. Los bytes 3, 6 y 10 corresponden a bytes de limpieza que marcan la separación de las medidas. Un ejemplo de paquete se puede ver en el capítulo 4.

Como se ha comentado previamente 'TheThingsNetwork' es la plataforma para dirigir y controlar la información que recibe el server. Para dirigir los dispositivos es necesario crear una sesión que funciona como *host* donde se registran las diferentes aplicaciones. Una aplicación es un punto de conexión para diferentes dispositivos que se distinguen entre ellos por un nombre de identificación. Para realizar la conexión cada dispositivo utiliza una clave de sesión, otra de aplicación y su identificador. La conexión

entre el componente y el microcontrolador se hace mediante el protocolo SPI.

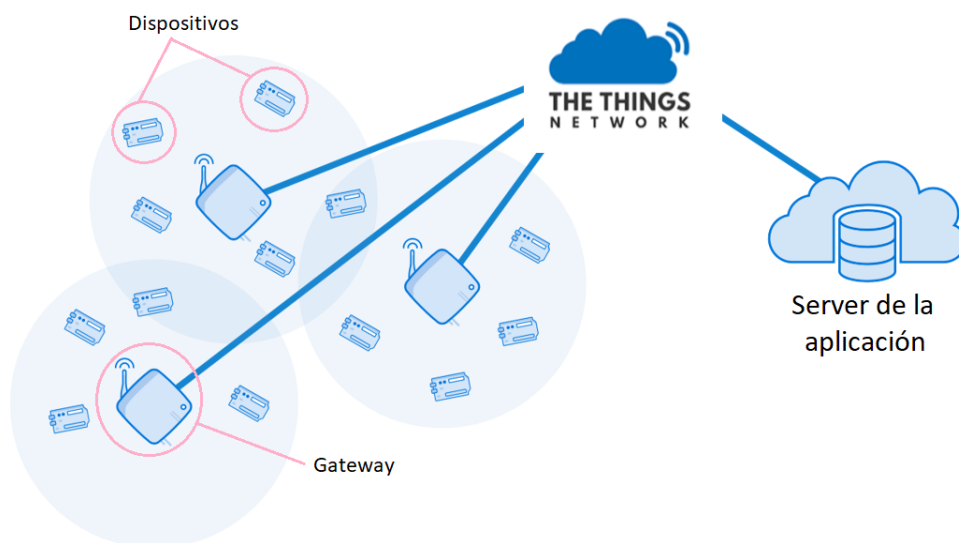


Figura 3.8: Jerarquía de una red LoRa. Un gateway funciona como punto de conexión para diferentes dispositivos que se conectan con el server para almacenar la información.

3.4. PCB

Todos estos componentes se han implementado sobre una PCB o placa de circuito impreso, que es un elemento físico en el que se instalan e interconectan componentes electrónicos. Para conectar dichos componentes se requiere de un sistema capaz de integrarlos y administrar las comunicaciones. Para este proyecto se ha elegido **sistema programable en chip (PSoC)**. Un PSoC es un microcontrolador que se caracteriza por contar con módulos de trabajo tanto digitales como analógicos y por la posibilidad que ofrece de programar y elegir las entradas y las salidas de dichos módulos. Esto ofrece un control más preciso (respecto a sus competidores en el mercado: Raspberry Pi o Beaglebone) sobre las frecuencias a las que trabajan los diferentes componentes del sistema y el comportamiento de éstos.

Para las comunicaciones internas entre los componentes se ha utilizado el protocolo SPI (del inglés Serial Peripheral Interface). Este protocolo ofrece una comunicación duplex donde ambos componentes conectados pueden recibir y enviar datos en un bus de tres líneas sobre el que se transmiten paquetes de información de 8 bits. Los dispositivos conectados se definen como maestro y esclavo. El maestro es aquel que inicia la transferencia y genera las señales de control y de reloj para la sincronización. El esclavo es el dispositivo controlado por el maestro. Las tres líneas de comunicación que, junto al reloj de sincronización, forman el protocolo son: la línea de selección de esclavo o **Select Slave (SS)**, la línea de transmisión de datos del maestro hacia el esclavo (MOSI) y la línea de transmisión de datos del esclavo hacia el maestro (MISO) [29].

En la figura 3.9 se puede observar el resultado final del sistema, donde se diferencian los diferentes módulos previamente explicados. Esta placa tiene un tamaño de 70mm de ancho por 75mm de largo por 20mm de alto y un peso de 45g.

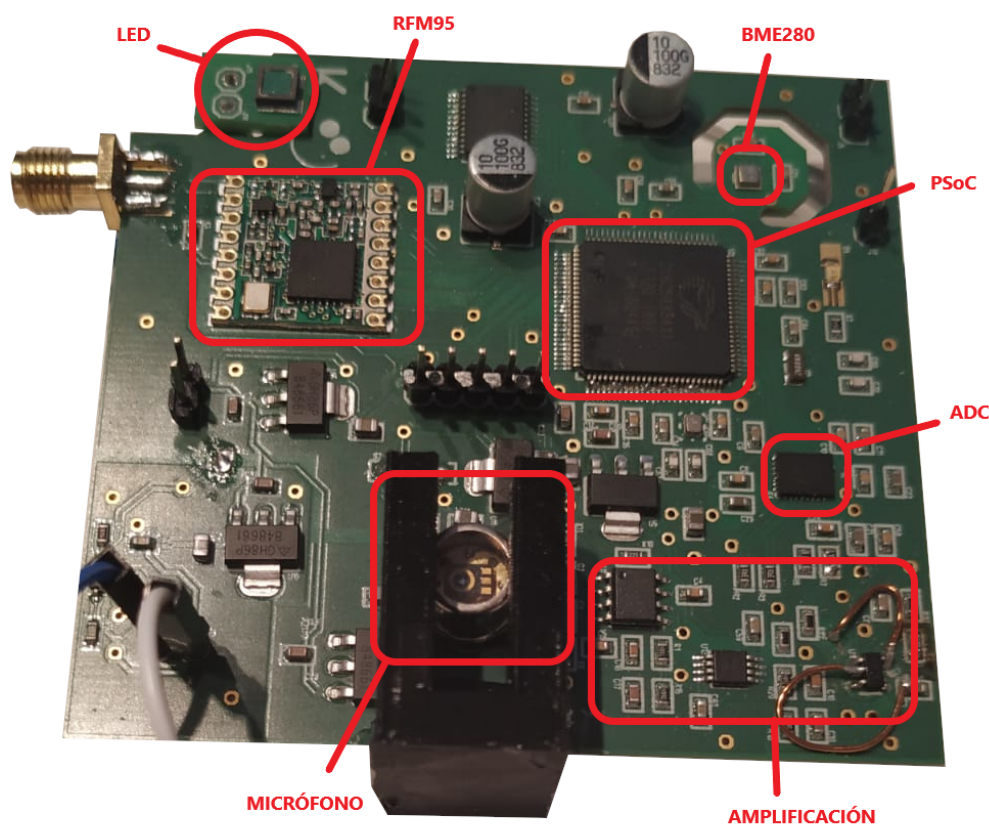


Figura 3.9: Placa base. Resaltados se pueden observar los componentes más destacables del sistema.

3.5. Producción de detectores fotoacústicos

Como se ha comentado previamente, uno de los objetivos del sistema es que sea lo más económico posible. Por ello se decidió diseñar y producir detectores fotoacústicos propios. Estos detectores se componen de un micrófono comercial ICS-40619 y una cápsula de **ácido poliláctico (PLA)** con la idea de contener el gas en el interior. Éste es un material de bajo coste que se puede moldear gracias a una impresora 3D. Debido a que sus filamentos permiten que el gas escape se ha sellado la cúpula de un pegamento epoxy de 2 componentes especializado en el aislamiento de circuitos eléctricos.

Para poder encapsular el gas se diseñó e imprimió una cámara en tres partes (figura 3.10). La cámara cuenta con unas hendiduras en el suelo donde se colocan los micrófonos preparados con el epoxy que servirá para pegar micrófono y cápsula. A su vez, se colocan las cápsulas en las pinzas del techo. Estas pinzas están diseñadas para aguantar las cápsulas con la menor intensidad posible, de

tal manera que cualquier fuerza que se ejerza tirando de ellas sea suficiente para soltarlas. Se sella la cámara, la cual ha sido previamente provista de unas juntas de goma en las uniones para optimizar el sellado, atornillando la parte superior y la inferior. Mediante los orificios laterales se introduce el gas hasta que llene el interior. Estos orificios se encuentran uno en la parte inferior y otro en la superior (en lados opuestos de la cámara) con el objetivo de poder introducir cualquier gas independientemente de su peso. Los más pesados se introducirán por el orificio inferior, llenando la cámara de abajo a arriba, mientras que con los más ligeros el proceso será el opuesto.

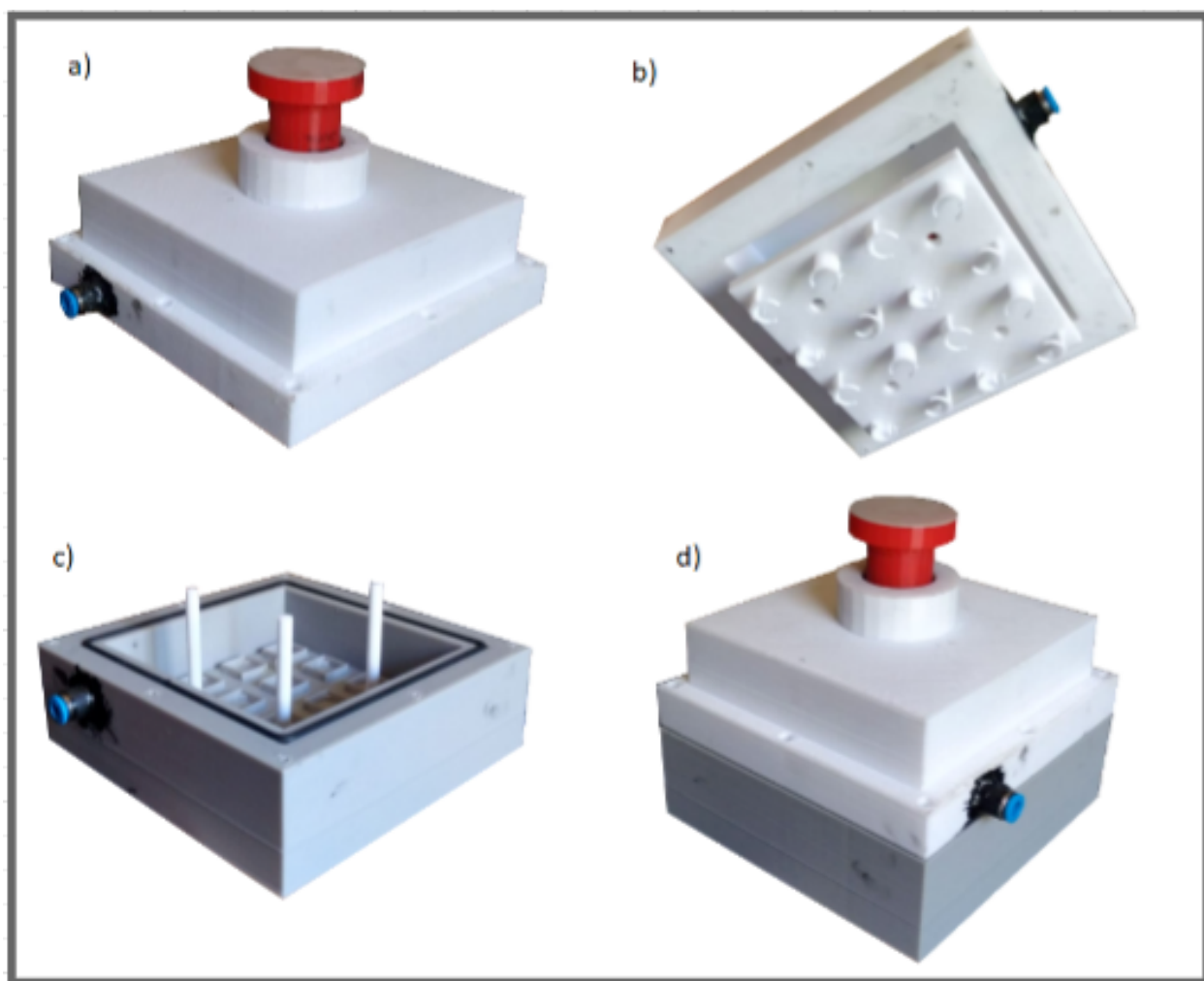


Figura 3.10: Cámara de gas. (a) parte superior de la cámara de gas, (b) techo con agarres de la cámara de gas, (c) parte inferior de la cámara de gas, (d) cámara de gas total.

PRUEBAS Y RESULTADOS

Para comprobar que el sensor construido funciona de la manera esperada se han realizado dos pruebas, la primera en un entorno controlado y la segunda en un entorno natural.

La primera prueba consiste en la medición de temperatura, humedad, presión y nivel de la señal introduciendo el sistema en una ambiente formado por concentraciones de CO_2 conocidas. El objetivo es calibrar el sensor, determinando la relación entre nivel de gas en el aire y señal.

La segunda prueba consiste en una toma de medidas en un entorno natural con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento tanto del BME como del protocolo de comunicación. Este periodo es lo suficientemente extenso como para asegurar la correcta transmisión de paquetes y la correcta medición de la temperatura, humedad y presión a tiempos largos.

4.1. Toma de medidas y pruebas

Las medidas se han realizado en un laboratorio asignado de la facultad de ciencias donde se dispone de los diferentes gases usados en bombona y un sistema para seleccionar el nivel de concentración a suministrar. Para ello el sistema se introduce en una cámara diseñada para el intercambio y el almacenamiento de gases en su interior. El proceso de medida ha tenido una duración aproximada de 8h y se divide en pasos diferenciados de 45 minutos.

Los dos primeros pasos se han utilizado para crear en el interior de la cámara una atmósfera homogénea de **dinitrógeno (N_2)** seco. Esto permite generar un entorno controlado y estabilizar la señal producida por el sistema asegurando la ausencia de CO_2 . Se ha realizado la medida de 4 concentraciones diferentes en **partes por millón (ppm)** : de 800ppm, de 1000ppm, 2500ppm y 5000ppm. Todas ellas con su correspondiente medición de temperatura, presión y humedad y seguidas de un paso de estabilización de la señal con N_2 .

Este proceso sirve para calibrar el sensor. Conociendo la señal producida, la concentración suministrada, la temperatura y la presión, se puede establecer la relación entre el nivel de gas en el ambiente y la señal generada.

Además, se realizó una toma de medidas de temperatura, humedad y presión junto con un ensayo del funcionamiento del protocolo de comunicación con el server. Estas pruebas se llevaron a cabo en una oficina de la Escuela Politécnica Superior, en un entorno de gases natural, con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento del componente y el correcto envío de la información. El sistema estuvo 4 horas midiendo y transmitiendo paquetes de forma periódica.

4.2. Resultados

Como se ha mencionado previamente, el objetivo de las medidas es encontrar la relación entre la concentración de CO_2 en el ambiente y la señal producida por el sistema. Por el funcionamiento propio del sensor se conoce que a mayor concentración de CO_2 menor será la señal, ya que se encuentran en el ambiente más partículas absorbiendo luz y, por lo tanto, llega menos luz IR a la cápsula.

En las figuras 4.1 y 4.2 se puede observar la relación entre CO_2 suministrado y nivel de la señal producida. En la primera figura se ve representado como tras un periodo de estabilización mediante N_2 se aplica un suministro de 800ppm. Este paso es indistinguible respecto a la señal estabilizada, lo que indica que el sistema no es sensible a concentraciones tan bajas. Sin embargo, en los siguientes suministros (de 1000ppm, 2500ppm y 5000ppm) es fácilmente apreciable el cambio producido en la señal al detectar CO_2 . En la segunda figura se representa la corrección de la **línea base**, que estipula una correlación entre variación media de señal respecto de la variación de concentración en el ambiente. Estas medidas demuestran el correcto funcionamiento del sensor y señala el límite inferior de concentración que se puede esperar que sea medible.

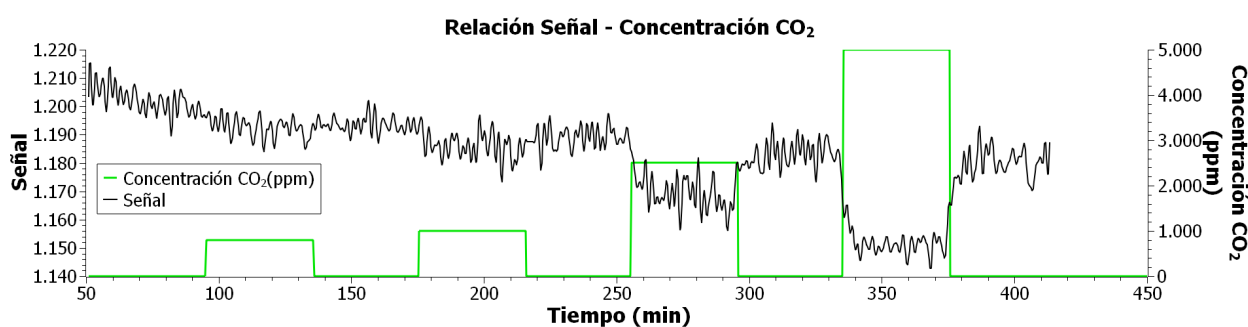


Figura 4.1: Relación entre la señal obtenida y la concentración suministrada. La señal se reduce a medida que la concentración de gas aumenta.

Para comprobar el correcto funcionamiento del BME280 se realizó una prueba de medición en un entorno de aire natural donde se midió tanto temperatura, como humedad y presión. El resultado de dichas medidas se puede observar en la figura 4.3 e indica que el componente funciona de manera esperada.

No obstante, es necesario realizar una calibración con el fin de establecer una relación entre señal

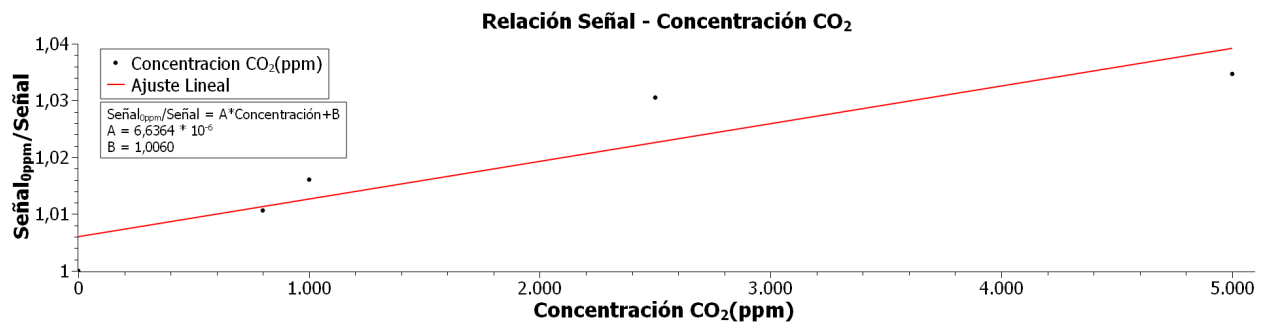


Figura 4.2: Formalización de una línea base que determina la variación media de la señal respecto de la variación de la concentración.

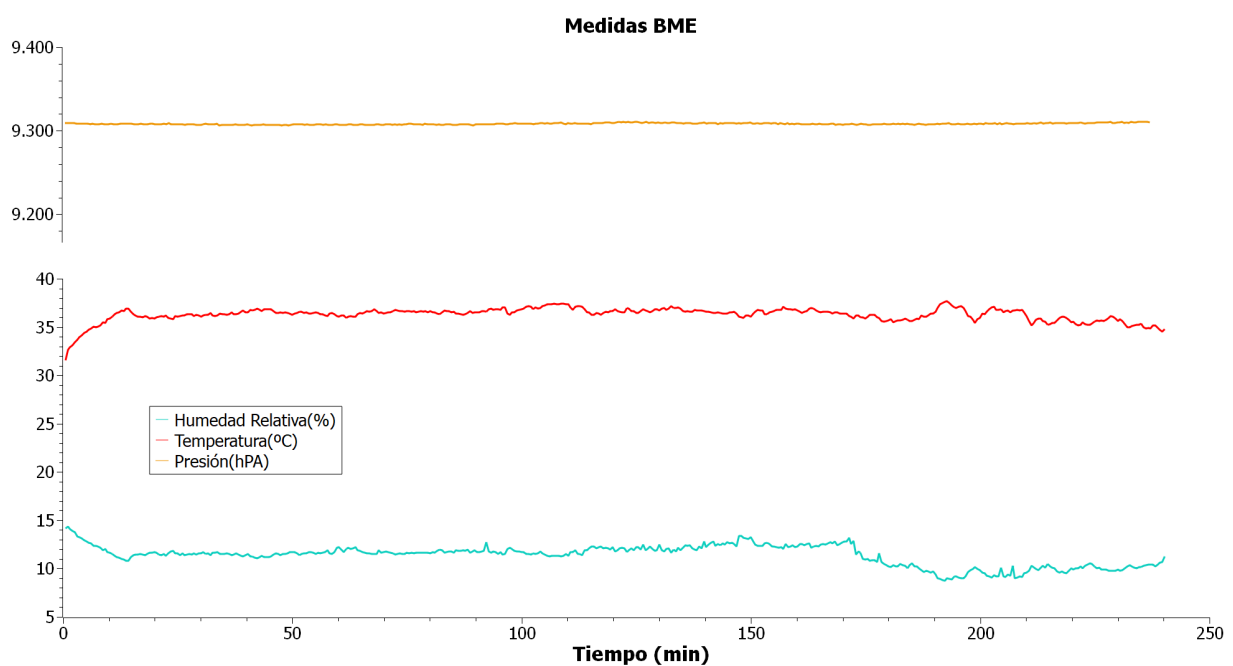


Figura 4.3: Pruebas de funcionamiento del BME280. Medidas realizadas a lo largo de 4 horas donde se han obtenido los datos de presión, temperatura y humedad.

medida y nivel de gas en el ambiente. Para ello se han tomado aquellos puntos donde la concentración era cero (los pasos de N₂ en los cuales la señal es máxima y debería ser estable) y se ha realizado un estudio de la variación que produce la temperatura en dicha señal. A partir de ese estudio se ha hallado la recta que ajusta la relación entre señal y temperatura (figura 4.4). Una vez se obtiene dicha recta es cuestión de aplicarla y normalizar los datos. No obstante, debido a que las variaciones de temperatura durante el proceso de medición han sido insuficientemente altas, esta normalización se asemeja tanto a los datos obtenidos originalmente que se ha decidido obviar.

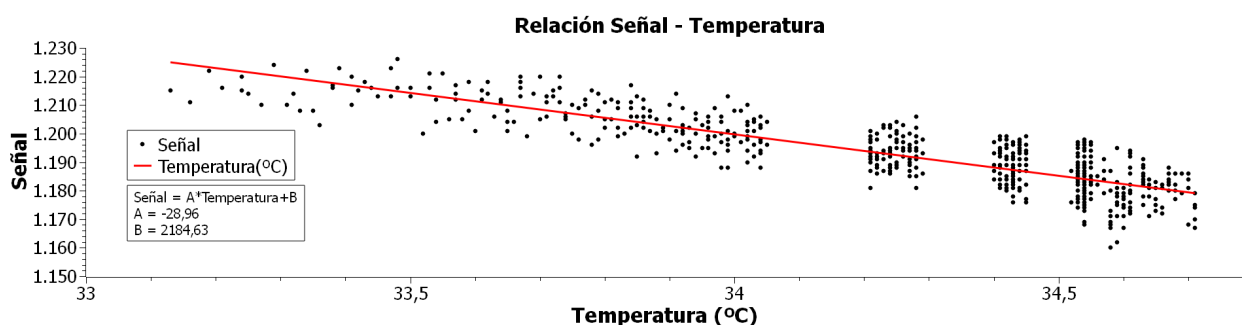


Figura 4.4: Relación entre la temperatura y la señal producida en ausencia de CO₂. Formalización de una línea base que determina la variación de temperatura respecto a la señal medida.

La humedad durante las medidas desciende a 0 debido a que se ha utilizado tanto N₂ como CO₂ seco. Sin embargo, en los pasos posteriores a la medida el suministro de gases cesa y permite que la cámara se vuelva a llenar de aire natural. En la figura 4.5 se observa cómo pese a que la humedad incrementa, la señal se mantiene estable. Esto corrobora la teoría de que la franja de IR en la cual el CO₂ absorbe no se ve afectada por el vapor de agua y demuestra que el sensor funciona de forma independiente a la humedad en el ambiente.

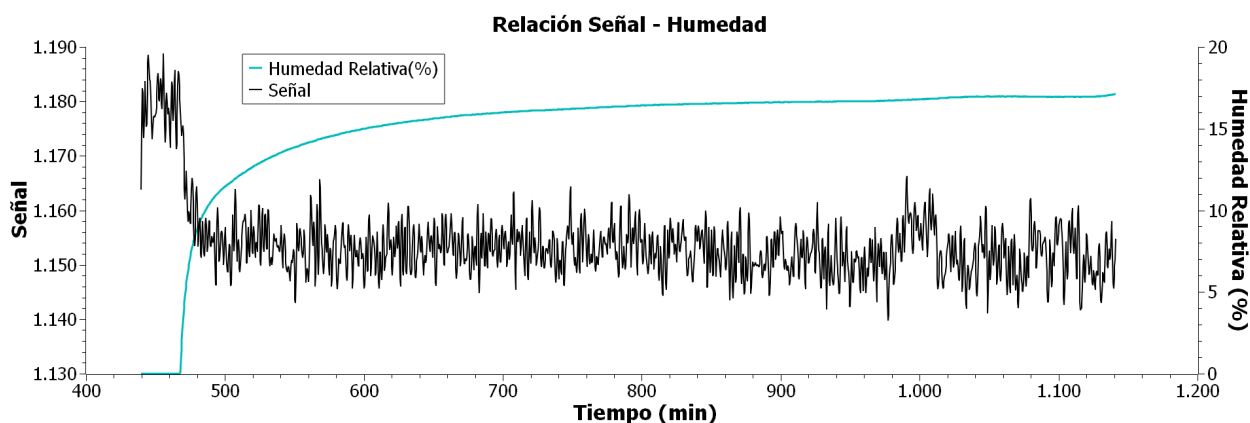


Figura 4.5: Relación entre la variación de la humedad y la señal producida por el sistema. Se observa la ausencia de correlación, mientras que la humedad tiende a aumentar la señal permanece estable.

Lamentablemente, la falta de equipo y de tiempo para poder realizar variaciones significativas en la presión han limitado el estudio sobre el efecto de ésta y la relación con la señal producida y la

concentración de gas medida.

Toda la información obtenida se transmite hacia el server mediante el protocolo LoRa previamente explicado. En la prueba realizada se enviaron medidas a lo largo de 4 horas con una frecuencia de 2 paquetes por minuto. En la figura 4.6 se puede observar el número de paquetes recibidos así como el contenido de estos. Se han recibido un total de 467 sobre 467 paquetes enviados, lo que supone una tasa de éxito de transmisión del 100 %. No obstante, el total de paquetes enviados teóricos eran 480, lo que significa que cada paquete se ha retrasado 0.85 segundos.

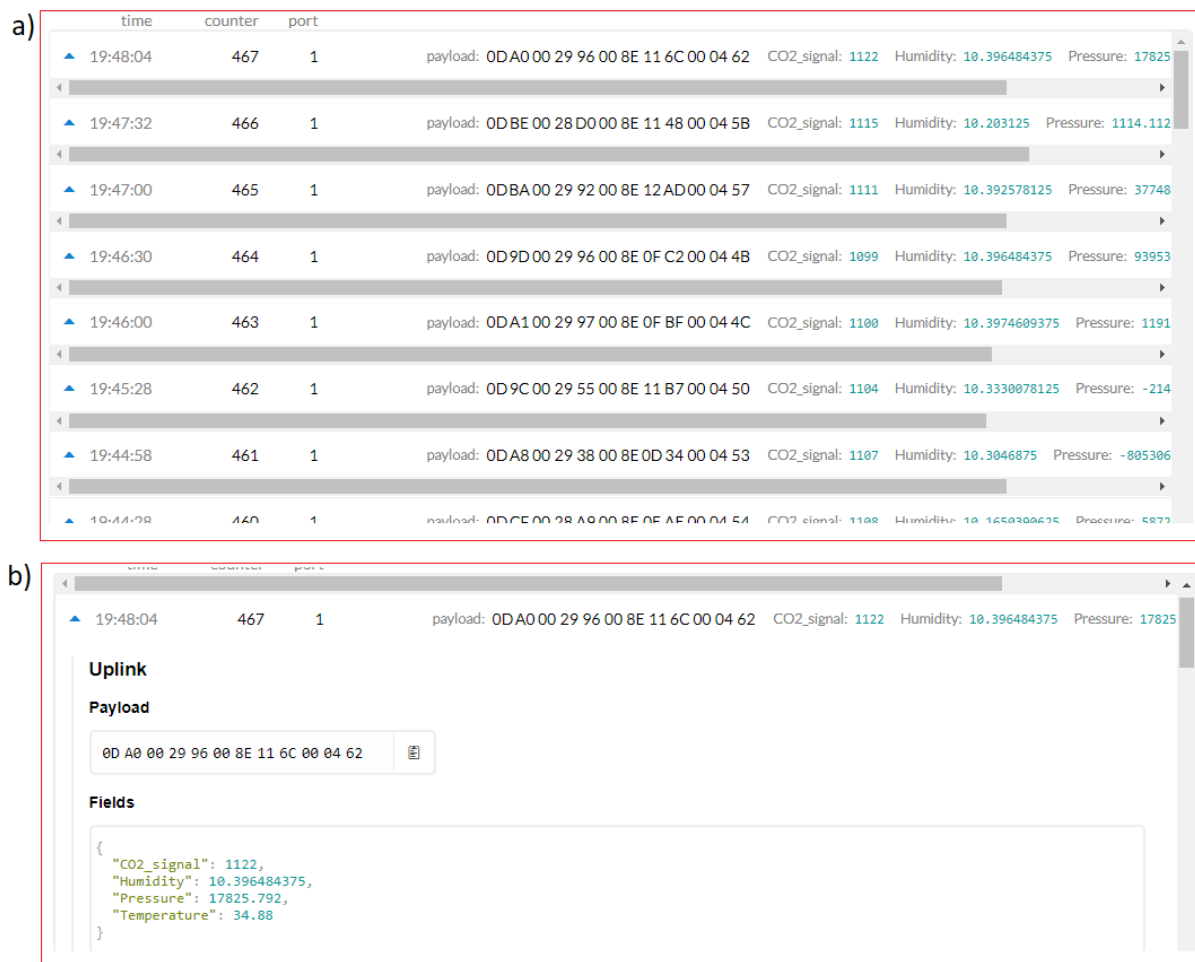


Figura 4.6: (a) Paquetes recibidos en el server mediante el protocolo LoRa a lo largo de 4 horas y (b) estructura y parseo de un paquete a través del portal 'TheThingsNetwork'.

CONCLUSIÓN

Se ha realizado el diseño de un sistema capaz de monitorizar la concentración de CO₂ en el ambiente mediante un prototipo de sensor NDIR de diseño propio basado en la detección fotoacústica. Este sensor cuenta con el led de luz IR comercial L13201 y el micrófono ICS-40619 encapsulado en un entorno de CO₂ para producir la señal. Esta señal es amplificada, ajustada y depurada mediante el uso de los 4 amplificadores comerciales: el THAT1510 y tres de la familia TS46. La señal ya tratada se interpreta gracias al ADC comercial LTC232114. Además, el sistema es capaz de tomar medidas de temperatura, presión y humedad gracias al uso de el sensor comercial BME280. Para la transmisión de las medidas realizadas se ha utilizado una red de área amplia y baja frecuencia LoRa basada en una técnica de espectro disperso que conecta con un server del portal 'TheThingsNetwork' donde se almacenan los datos. Todos los componentes están integrados e interconectados en una placa base que cuenta con un microcontrolador PSoC para administrar la ejecución del sistema. La comunicación interna entre componentes se realiza a través del protocolo de comunicación SPI.

Se han realizado unas medidas para calibrar el sensor en un entorno controlado introduciendo el sistema en una cámara especializada para el almacenamiento e intercambio de gases. Dichas pruebas han demostrado que el sensor funciona de manera esperada, que es sensible a concentraciones superiores a 800ppm y que no se ve afectado por la humedad. Asimismo, se ha probado el funcionamiento del BME280 y la correcta transmisión de datos a través del protocolo LoRa. Ambas pruebas han resultado satisfactorias.

De cara al futuro y con el fin de de mejorar la calibración y de integrar el sensor en pruebas de campo se realizarán pruebas específicas para estudiar de forma más detallada el efecto de la temperatura, así como el de la presión, en las medidas. La idea final es introducir el sensor en un recipiente donde, por efectos naturales, se vaya acumulando el CO₂. Se integrará un motor que abra dicho recipiente cuando el sistema detecte una saturación de gas y vuelva a cerrarlo cuando los niveles vuelvan a un estándar concretado. A lo largo de este proceso cíclico se enviará y almacenará la información al server para su estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Baliram and G. Jadhav, "Climate change," 02 2020.
- [2] J. T. Hardy, *Climate Change: Causes, effects and solutions*. Wiley, 06 2003.
- [3] A. Kirby, *El clima en peligro*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España, 10 2009.
- [4] C. G and M. Cascella, *Gas Laws and Clinical Application*, p. 1. 09 2019.
- [5] K. Hadiningrum and R. Fenny, "Optimization of the amount of gas moles determination through boyle's law and gay-lussac's law experiments," *Journal of Physics: Theories and Applications*, vol. 2, p. 53, 09 2018.
- [6] R. I. Corp., "The rotronic humidity handbook," 12 2005.
- [7] Tserice, *What is a Temperature Sensor?*, 01 2001.
- [8] G. Meijer, G. Wang, and A. Heidary, *Smart temperature sensors and temperature sensor systems*, pp. 57–85. 02 2018.
- [9] K. Jack, E. Nwangwu, I. Etu, and E. Osuagwu, "A simple thermistor design for industrial temperature measurement," *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 11, pp. 57–66, 05 2016.
- [10] C.-Y. Lee and G.-B. Lee, "Humidity sensors: A review," *Sensor Letters*, vol. 3, p. 12, 01 2005.
- [11] Rotronic measure solutions, 135 Engineers Road, Hauppauge, NY 11788, *The Capacitive Humidity Sensor – How it Works Attributes of the Uncertainty Budget*.
- [12] J. Boudaden, M. Steinmaßl, H.-E. Endres, A. Drost, I. Eisele, C. Kutter, and P. Müller-Buschbaum, "Polyimide-based capacitive humidity sensor," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 18, 05 2018.
- [13] Semikron, *Effect of Humidity and Condensation on Power Electronics Systems*, 07 2016.
- [14] S. Büttgenbach, I. Constantinou, A. Dietzel, and M. Leester-Schädel, *Piezoresistive Pressure Sensors*, pp. 2–5. 05 2020.
- [15] S. Büttgenbach, I. Constantinou, A. Dietzel, and M. Leester-Schädel, *Piezoresistive Pressure Sensors*, pp. 21–85. 05 2020.
- [16] K. Kaur, "Carbon dioxide sensor," 07 2013.
- [17] "Espectro de luz y absorción de ondas," 2020, (Fecha de acceso: 06/06/2020).
- [18] B. Fontal, *El Espectro Electromagnético y sus Aplicaciones*. Universidad de los Andes, 12 2005.
- [19] D. Cardador, D. García, I. Deriziotis, Rodríguez, and J. Llorca, "Macroporous silicon filters, a versatile platform for ndir spectroscopic gas sensing in the mir," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 166, pp. B1010–B1015, 07 2019.
- [20] B. Lacaze, "About the bidimensional beer-lambert law," 02 2012.
- [21] "Funcionamiento de un sensor ndir," 2020, (Fecha de acceso: 03/06/2020).

- [22] T. Salman and R. Jain, *Networking protocols and standards for internet of things*, pp. 215–238. 02 2017.
- [23] M. Hizlan, “Spread spectrum,” *Handbook of Computer Networks*, vol. 1, pp. 538–552, 11 2011.
- [24] S. Vaezi-Nejad, M. Cox, and N. Cooper, “Novel frequency chirp measurement techniques,” *Measurement and Control*, vol. 44, pp. 53–57, 03 2011.
- [25] “Chirp, señal de frecuencia variante,” 2020, (Fecha de acceso: 28/05/2020).
- [26] M. Zennaro, E. Pietrosevoli, M. Rainone, D. Trincherio, M. Poletti, and G. Colucci, “Troppo lora: Tropospheric personal observatory using lora signals,” 04 2020.
- [27] E. D. Montigny, “Photoacoustic tomography : Principles and applications,” *École Polytechnique de Montréal*, 06 2014.
- [28] G. R. Gutiérrez, “Amplificador lock-in,” Master’s thesis, Universidad Autónoma de Madrid, 01 2019.
- [29] F. Leens, “An introduction to i2c and spi protocols,” *Instrumentation Measurement Magazine, IEEE*, vol. 12, pp. 8 – 13, 03 2009.
- [30] V. M. López, *Normalización nacional en Compatibilidad Electromagnética*, 11 2004.

DEFINICIONES

camino óptico se define como camino óptico a la distancia que recorre la luz en el vacío en un tiempo 't'.

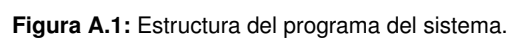
compatibilidad electromagnética disciplina que estudia los mecanismos para eliminar, disminuir y prevenir los efectos de acoplamiento entre un equipo eléctrico o electrónico y su entorno electromagnético [30].

línea base especificación o que ha sido revisada formalmente, sobre la que se ha llegado a un acuerdo, y que de ahí en adelante servirá como base para un desarrollo posterior.

ACRÓNIMOS

- ADC** conversor analógico digital.
- CFC** clorofluorocarbonos.
- CNT** coeficiente negativo de temperatura.
- CPT** coeficiente positivo de temperatura.
- CSS** Chirp Spread Spectrum.
- CH₄** metano.
- DTR** detector de temperatura resistivo.
- EIND** espectroscopia de infrarrojos no dispersiva.
- GEI** gases de efecto invernadero.
- H₂O** vapor de agua.
- IPS** interfaz periférica serial.
- IR** infrarrojas.
- LoRa Long Range**.
- N₂** dinitrógeno.
- N₂O** óxido nitroso.
- O₃** ozono.
- PAP** pulsación por ancho de pulsos.
- PLA** ácido poliláctico.
- ppm** partes por millón.
- PSoC** sistema programable en chip.
- SF₆** hexafluoruro de azufre.
- SS** Select Slave.

APÉNDICES



CONSTRUCCIÓN DE UN PAQUETE PARA SU TRANSMISIÓN

Código B.1: Función de construcción de un paquete LoRa con las medidas de la señal, la temperatura, la presión y la humedad.

```
339 void convert_to_lora_data_type(long temp, long hum, long press) {
340     bme_data[0] = (uint8)(temp>>8);
341     bme_data[1] = (uint8)(temp & 0x00FF);
342     bme_data[2] = 0x00;
343     bme_data[3] = (uint8)(hum>>8);
344     bme_data[4] = (uint8)(hum & 0x00FF);
345     bme_data[5] = 0x00;
346     bme_data[6] = (uint8)(press>>16);
347     bme_data[7] = (uint8)(press>>8);
348     bme_data[8] = (uint8)(press & 0x0000FF);
349     bme_data[9] = 0x00;
350     bme_data[10] = (uint8)(LockInMSB>>8);
351     bme_data[11] = (uint8)(LockInMSB & 0x00FF);
352     /*
353     UART_PutString("\r\n -----");
354     for(int i=0;i < 12;i++) {
355         sprintf(sendstring, "%02X ", bme_data[i]);
356         UART_PutString(sendstring);
357     }
358     UART_PutString("\r\n -----");
359     */
360 }
```